

地铁穿越复杂建筑集群风险及对策研究

汪国良

(中铁第四勘察设计院集团有限公司,湖北 武汉 430063)

摘要:为研究复杂建筑集群条件下地铁穿越时的风险应对措施,本文通过建立科学合理的风险评价指标,对地铁穿越建筑集群的多种相互作用关系(下穿、侧穿等)建立整体三维空间模型,全面分析地铁结构与建筑集群的空间相互影响。结果表明:采取合理控制地铁结构与邻近建筑物距离、施工参数控制、合理安排施工时序等针对性的技术和管理措施,可以有效管控风险,确保工程安全。本文结果可为类似工程应用提供一定的参考。

关键词:建筑集群; 地铁穿越; 风险; 对策; 数值模拟

中图分类号:U231⁺.3

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)07-0043-06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.07.087

Research on risks and countermeasures of subway crossing complex building clusters

WANG Guoliang

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: In order to study the risk response measures of subway crossing under the condition of complex building clusters, the overall three-dimensional spatial model of various interaction relationships (underpassing, side-passing, etc.) of subway crossing building clusters is established by establishing scientific and reasonable risk evaluation indicators, and the spatial interaction between subway structure and building clusters is comprehensively analyzed. The results show that targeted technical and management measures such as reasonable control of the distance between the subway structure and adjacent buildings, control of construction parameters, and reasonable arrangement of construction timing can effectively control risks and ensure project safety. The results can provide some reference for similar engineering applications.

Key words: building clusters; subway crossing; risk; countermeasure; numerical simulation

随着轨道交通的快速发展,城市地铁线网日益密集,不可避免地出现地铁穿越地块等情况。此类工程具有周边环境复杂、设计施工难度大等特点,需要有效控制风险。现有文献中,王敦显^[1]结合徐州2号线,针对复杂环境条件下盾构下穿铁路变形控制进行了分析,研究了下穿施工对铁路设施的影响,表明地铁施工及振动荷载引起的地表沉降量能够满足控制标准;刘志涛等^[2]在地表注浆加固等常规措施难以实施的情况下,结合实践研究了基于露空长度优化的盾构隧道下

穿合肥火车站施工沉降控制方法,表明控制刀盘超挖和盾尾露空长度能有效降低周边地层变形;沈佳佳等^[3]针对新建建筑上跨施工对浅埋大断面隧道结构的影响进行了研究,评估了附加荷载对隧道结构的作用,确保了新建建筑施工期间下方隧道结构的安全稳定;贺美德等^[4]以北京地铁盾构区间隧道近距离侧穿高层建筑为背景,对隧道施工引起的邻近高层建筑物的结构沉降和基础倾斜进行了研究,计算结果表明:模型的竖向位移等值线在建筑物附近有突变现象;梁超强等^[5]针对太原

收稿日期:2024-03-19

作者简介:汪国良(1989—),男,高级工程师,从事地下结构及岩土工程设计与研究工作。

地区汾河漫滩地层盾构下穿浅基础建筑物工况,分析了其沉降规律,研究表明:建筑物的存在对形成的横向沉降槽影响较小,但会使建筑物及周围地层在沉降过程中表现出滞后性和整体性。综上所述,国内研究人员针对地铁穿越铁路、高铁站房、单体建筑物等开展了一定的研究工作,但对于建筑集群的整体空间研究较少。由于地块内建筑形式多样、基础条件差异较大、变形控制要求高,一旦发生工程风险事件,可能会造成较大的生命财产损失,并带来极其恶劣的社会影响。为此,本文结合具体工程案例,建立整体三维空间模型,对复杂建筑集群条件下地铁穿越的风险应对策略进行全面分析,以期类似工程提供一定的参考。

1 工程概况

1.1 项目概况

某市轨道交通 2 号线穿越一地块建筑集群,该地块总面积约为 43 707.6 m²。建筑集群包含 2~3 层地下室,埋深约为 9.5~11.5 m。地下室基坑采用围护桩+锚索、双排围护桩+锚索及放坡支护等形式。地下室覆盖地铁车站主体及附属范围,地铁车站为地下三层结构,结构埋深约为 28.37 m,车

站外包总长为 202.2 m,标准段外包宽度为 20.9 m。其中负一层与地块地下室合建,负二层与负三层采用“坑中坑”开挖形式施工,车站主体围护采用 $\varnothing 1\ 200\ \text{mm}@1\ 600\ \text{mm}$ 围护桩+两道支撑的支护形式,基底标高约为 18.000 m。地块范围穿越的地铁隧道长度约为 255 m,隧道外径为 6 000 mm,内径为 5 400 mm,衬砌厚度为 300 mm,采用 C50 防水混凝土,抗渗等级为 P12。管片采用弯螺栓连接,管片环缝接触面及纵缝接触面均未设置凹凸榫。

地铁隧道分别下穿售楼部、地块基坑围护结构及小区地下车库等。其中,02[#]、04[#]~07[#]塔楼与隧道间最小净距分别为 23.3、49.6、85.3、142.6、88.1 m,距离较远;隧道与地块基坑围护桩间的最小净距为 5.3 m,与售楼部桩基础间的最小净距为 5.7 m,与 03[#]、09[#]~11[#]楼桩基础间的最小净距分别为 7.5、3.5、2.1、5.7 m,与地下车库间的最小净距为 8.4 m。建筑集群与地铁的平面关系如图 1 所示,与地铁距离较近的建筑物及基本情况如表 1 所示。售楼部、地块基坑围护结构、11[#]楼与隧道的剖面关系如图 2 所示,区间隧道下穿售楼部并侧穿 11[#]楼。

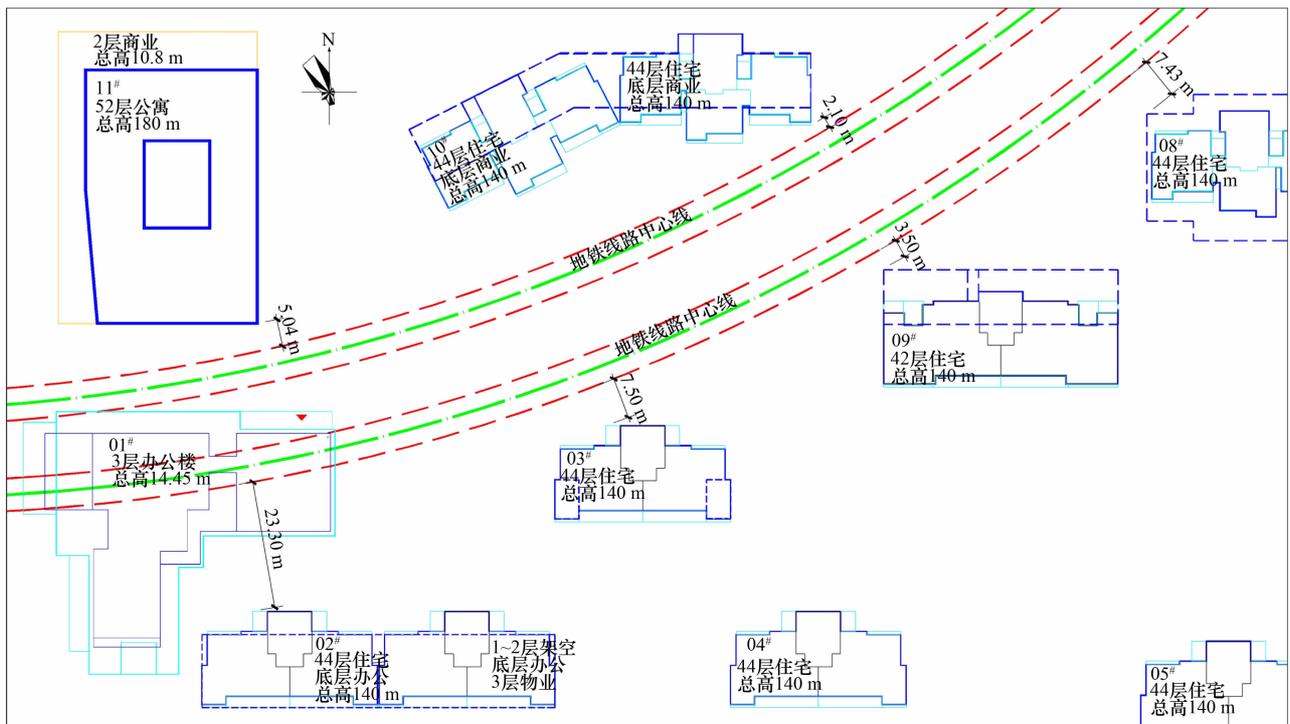


图 1 建筑集群与地铁的平面关系

表 1 建筑物及基本情况

建筑物	基本情况
地块基坑支护	采用围护桩 + 锚索等支护形式; 钻孔灌注桩支护, 桩径为 1.0 m, 桩间距为 2.0 m
售楼部	3 层框架结构, 采用旋挖桩基础, 桩径分别为 1.0、0.8 m
03#楼	44 层剪力墙结构体系, 采用旋挖桩基础, 桩径为 1.2 m, 桩长超过 24 m
09#、10#楼	42、44 层剪力墙结构体系, 采用旋挖桩基础, 桩径为 1.2 m, 桩长超过 24 m
11#楼	52 层剪力墙结构体系, 采用旋挖桩基础, 桩径为 1.2 m, 桩长超过 24 m
地下车库	地下二至三层, 采用筏板基础

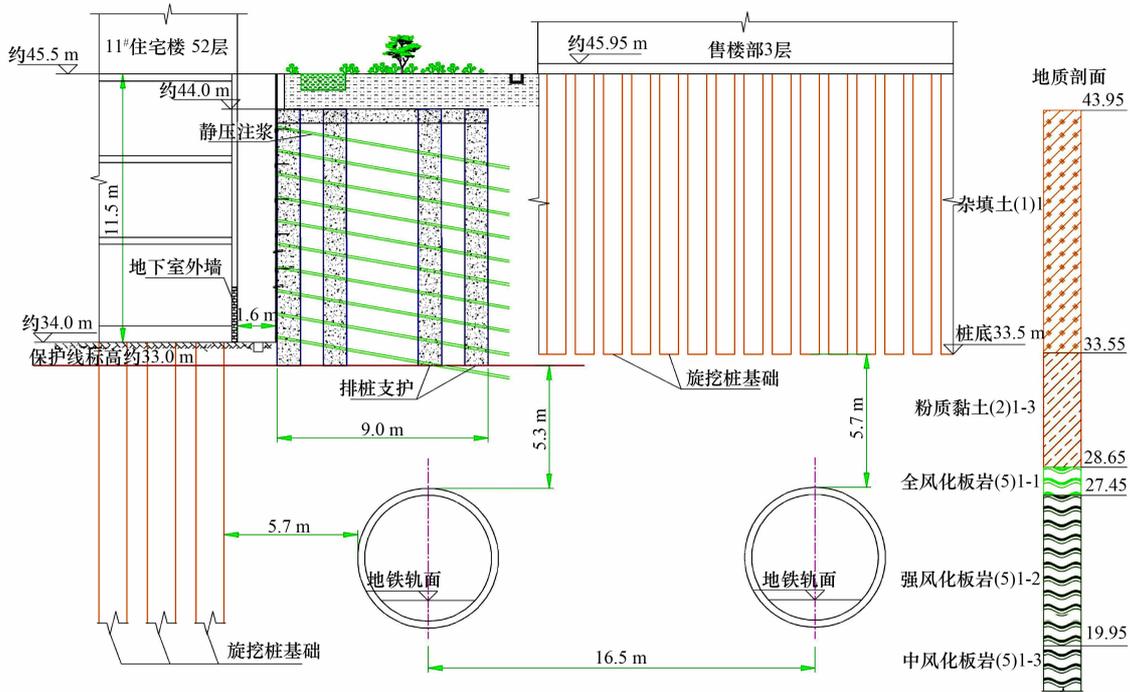


图 2 售楼部、地块基坑围护结构、11#楼与隧道剖面关系

1.2 工程地质条件

场地原始地貌为剥蚀丘陵, 现状为道路、休闲广场、在建小区等, 上覆土层主要包括第四系全新统人工填土层、第四系全新统冲洪积粉质黏土层、砂卵石层及残积层, 下伏基岩为元古界板溪群板岩地层。场地分布的特殊岩土主要为人工填土、残积土及风化岩。项目范围对应主要地层的工程性能指标值如表 2 所示。场地内未发现地表水, 附近地表水距场地最近约为 40 m。地下水类型包括上层滞水及基岩裂隙水, 其中上层滞水为包气带水, 基岩裂隙水主要为潜水, 局部可能存在承压性。

2 地铁穿越风险

2.1 安全评判标准

工程实施步骤: 先完成基坑支护结构及地块

地下车库、地铁车站的施工, 随后进行地铁隧道穿越地块的施工, 最后实施公寓楼结构(公寓楼结构可在盾构穿越前局部施工)。因此, 必须严格控制地铁施工对基坑和地下车库的影响, 以及后期公寓楼结构完成后对地铁结构的影响。

项目用地及建筑位于轨道交通规划控制保护地界之内。为确保轨道交通结构安全, 参照其他同类研究经验^[5~9], 提出控制指标要求如下。

(1) 地块项目施工引起的轨道交通结构沉降量及水平位移量不得超过 20 mm。

(2) 因建筑物垂直荷载(包括基础地下室)及降水、注浆等施工因素引起的轨道交通隧道外壁附加荷载不得超过 20 kPa; 因打桩振动或爆炸产生的震动引起的隧道峰值速度不得超过 2.5 cm/s。

(3) 框架结构建筑物地基允许变形不得超过 $0.002l$ (l 为相邻柱基的中心距离, mm), 对于 $H_g >$

表 2 主要地层的工程性能指标

岩土名称	天然密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	直接快剪		压缩模量/MPa	变形模量/MPa	弹性模量/MPa	泊松比	渗透系数/ ($m \cdot d^{-1}$)
		黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)					
杂填土(1)1	2.00	8	8	4.00	—	—	0.45	2.00
粉质黏土(2)1-2	1.97	25	20	6.19	—	—	0.35	0.05
细砂(2)4-1	1.98	2	35	—	28.0	—	0.30	5.00
细圆砾(2)8-1	2.00	3	35	—	60.0	—	0.25	20.00
粉质黏土(4)1-2	1.89	32	20	5.03	—	—	0.30	0.05
全风化板岩(5)1-1	1.97	30	20	—	—	50.0	0.25	0.04
强风化板岩(5)1-2	2.35	50	25	—	—	120.0	0.20	0.60
中风化板岩(5)1-3	2.60	100	40	—	—	2 000.0	0.15	0.20

100 m (H_g 为自室外地面起算的建筑物高度, m) 的高层建筑, 整体倾斜不得超过 0.002, 其中倾斜是指基础倾斜方向两端点的沉降差与其距离的比值。

考虑到轨道交通隧道实施前, 地块项目的基坑工程及地下车库结构已施作完成, 而区间隧道施作完成后再实施公寓楼结构, 因此需重点分析区间隧道实施过程对地下车库的影响, 并研究邻近公寓楼施工引起的地铁结构变形是否在允许范围之内, 以及内力的控制性参数是否在结构强度安全承载范围之内。

2.2 数值模拟分析

2.2.1 模型假定

采用岩土有限元分析软件 Midas GTS 进行模拟。根据工程的实际情况和特点, 在三维非线性动力分析时假定如下^[10]。

(1) 将土层简化为水平层状分布的连续材料。基于宏观材料行为, 岩土体采用摩尔-库伦弹塑性模型, 并使用实体单元模拟土体。

(2) 在初始地应力计算时只考虑土体自重应力, 忽略岩土体构造应力, 使岩土体在自重作用下达到土体平衡状态。

(3) 项目 ± 0 标高以下部分(包括地下车库、公寓楼地下室及桩基)在此段地铁施工之前已完成施工。当隧道掘进至该范围时, ± 0 标高以下部分均已施工完毕。

2.2.2 模型建立

模型范围内地层采用弹塑性模型, 隧道管片、桩和支撑采用弹性模型。模型尺寸为 430 m \times 230 m \times 40 m (长 \times 宽 \times 高)。建筑集群有限元分析模型如图 3 所示, 地铁穿越地块建筑集群三维模型如图 3、4 所示。

2.3 结果分析

地铁施工过程中建筑集群位移云图如图 5 所示, ± 0 标高以上结构施工过程中隧道位移云图如图 6 所示。

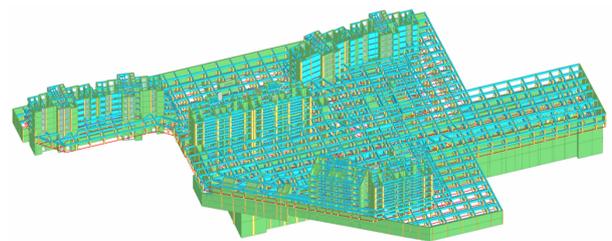
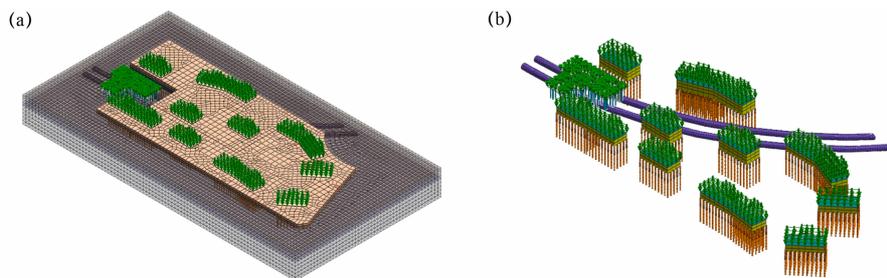


图 3 建筑集群设计分析模型



(a) 整体模型; (b) 相对关系模型

图 4 地块建筑与地铁结构整体分析模型

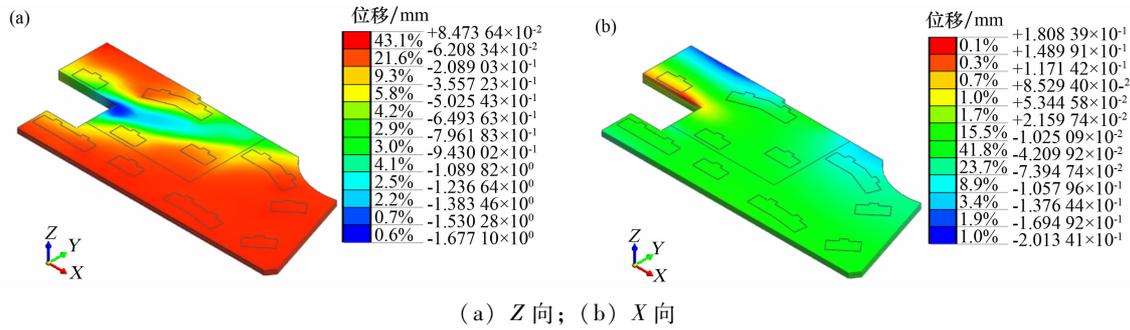


图 5 地铁施工过程中建筑集群位移云图

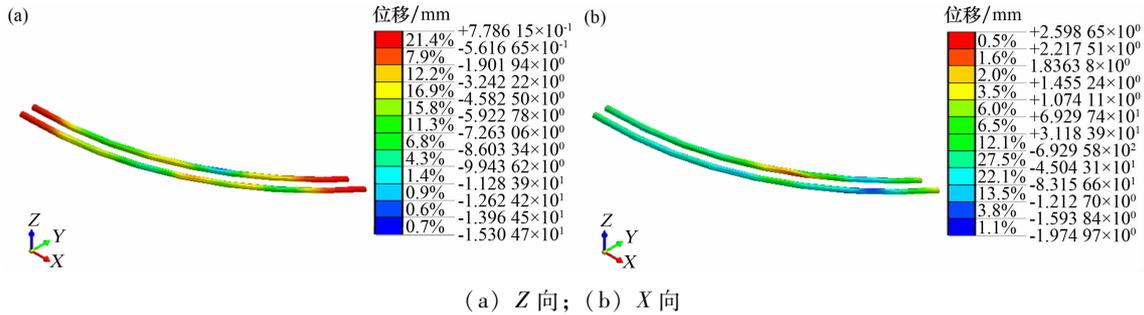


图 6 ±0 标高以上结构施工过程中隧道位移云图

由图 5 可知：地铁施工会引起建筑集群局部沉降或隆起，最大沉降约为 1.7 mm，最大隆起约为 0.08 mm，最大水平位移约为 0.2 mm。框架结构变形沉降差为 1.78 mm < 20 mm；倾斜为 $8 \times 10^{-6} < 0.002$ ，满足要求。地铁开挖导致近基坑侧建筑物沉降，远基坑侧建筑物略微隆起，形成不均匀沉降，但整体上地铁施工对已完成建筑集群结构影响较小。

由图 6 可知：地面以上部分公寓楼施工会造成已完成地铁隧道局部沉降或隆起，盾构隧道最大沉降约为 15.3 mm，最大隆起约为 0.78 mm，最大水平位移约为 2.6 mm。公寓楼施工加载引起的沉降较大，但仍基本满足限值要求。

通过三维模型计算结果分析地铁穿越集群建筑的相互影响可知：1) 工程对地铁结构的影响主要集中在公寓楼施工阶段。后期由于地铁基础持力层均为中风化板岩，地质条件较好，造成的影响较小；2) 地下车库及公寓楼设计和施工应充分考虑后期地铁下穿可能对其造成的影响。同时，建议在车库施工前核实车库及楼桩基下方持力层的承载力，并处理地下车库下方不良持力层，以减小后期盾构施工引起的变形；3) 公寓楼施工会造成已完成地铁区间隧道局部沉降或隆起，盾构隧道变形以沉降为主，且越靠近公寓楼桩基，沉

降变形越大。但由于区间隧道为整体变形，管片差异变形及纵向曲率均较小，对管片接缝伸张影响较小；4) 为进一步减小公寓楼施工超载对地铁隧道的影响，建议靠近地铁隧道的工程桩桩长加长，确保桩底位于地铁隧道下方。

2.4 工程风险应对

(1) 地下水处理风险。地下水处理不当易导致基坑水满为患，坑壁坍塌造成地面沉降，引起相邻建筑物开裂、倾斜，相邻道路开裂、塌陷，从而影响轨道交通安全。因此，基坑开挖过程中务必做到按需降水，以减少降水引起的地铁轨面沉降及地面沉降。

(2) 公寓楼施工风险。公寓楼施工会对轨道交通造成不平衡超载，容易引起基坑变形过大或结构异常变形。因此，要求建筑集群多个区域尽可能在轨道交通车站两边对称施工，以避免形成不平衡荷载，同时应避免集中大量堆载造成下方轨道交通隧道沉降。

(3) 管理以及安全意识风险。项目工程量大，同时作业面多，管理难度较大，管理制度不健全或者安全风险意识淡薄，容易造成人为安全、质量事故。因此，应采取有效的管理措施使工程处于严格监管之下。施工中不得随意更改围护结构长度、嵌入深度，对事故桩不做处理等，容易导致工程

事故;不得堆放材料过多,会使结构承受较大的超载,当超出设计安全储备时会发生过大变形;避免振动施工,以免引起地铁结构破坏损伤。

(4) 信息不对称风险。工程应加强信息化施工,施工期间应根据监测资料及时控制和调整施工进度及施工方法,对施工全过程进行动态控制。

2.5 实测结果

项目于 2021 年开工,目前已完成地铁车站、临近高层建筑封顶及盾构隧道洞通工程的施工。施工期间,实测盾构隧道最大沉降约为 14.1 mm,最大隆起约为 0.6 mm,最大水平位移约为 3.3 mm;实测建筑集群最大沉降约为 1.1 mm,最大隆起约为 0.02 mm,最大水平位移约为 0.3 mm。在采取上述有效措施的情况下,地铁与建筑集群的变形控制值、差异沉降及变形曲率均满足控制要求,成功实现了对工程风险的有效控制,确保了工程的安全实施。

3 结 论

(1) 地铁施工会引起建筑集群局部沉降或隆起,变形以沉降为主,且越靠近地铁隧道正上方,其位移值越大。

(2) 公寓楼施工会造成已完成地铁隧道局部沉降或隆起,盾构隧道变形以沉降为主,且越靠近公寓楼桩基,沉降变形越大。由于隧道为整体变形,管片差异变形及纵向曲率均较小,对管片接缝伸张影响较小。

(3) 基于分析结果,通过采取合理控制隧道与邻近建筑物距离、盾构施工参数优化、合理安排施工时序等针对性的技术和管理措施,可以有

效管控风险,确保工程安全。

参考文献:

- [1] 王敦显. 复杂环境条件下盾构下穿铁路变形控制分析[J]. 现代交通技术,2020,17(6):78-83.
- [2] 刘志涛,王立川,蒋崑松,等. 基于露空长度优化的盾构隧道下穿合肥火车站施工沉降控制探讨[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(增刊2):565-573.
- [3] 沈佳佳,万利,张长安,等. 新建建筑上跨施工对浅埋大断面隧道结构的安全影响研究[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(9):2672-2681.
- [4] 贺美德,刘军,乐贵平,等. 盾构隧道近距离侧穿高层建筑的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(3):603-608.
- [5] 梁超强,葛忻声,赵娟,等. 盾构下穿浅基础建筑的沉降规律分析[J]. 太原理工大学学报,2021,52(2):256-262.
- [6] 杜明芳,张鹏,易领兵,等. 新建隧道施工对邻近既有地铁车站及隧道影响研究[J]. 工程建设,2024,56(1):18-23.
- [7] 戴轩,郭旺,程雪松,等. 盾构隧道平行侧穿诱发的建筑纵向沉降实测与模拟分析[J]. 岩土力学,2021,42(1):233-244.
- [8] 谭伟姿. 盾构重叠隧道极小间距侧穿居民楼施工案例[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(增刊1):291-298.
- [9] 张治国,李振波,张孟喜,等. 考虑隧道开挖与桩基相互作用的大底盘塔楼建筑变形分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2021,51(4):603-609.
- [10] 张俊龙,李大华. 基坑开挖对邻近建筑物筏板变形影响的 MIDAS/GTS 数值分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2022,40(6):1-5.